JKIICE Journal of the Korea Institute of Information and Communication Engineering

한국정보통신학회논문지(J. Korea Inst. Inf. Commun. Eng.) Vol. 20, No. 12 : 2310~2316 Dec. 2016

UV 레이저 노출조건에 따른 FBG 센서의 방사선 영향

김종열* · 이남호 · 정현규

Radiation Effects on Fiber Bragg Grating Sensors by Irradiation Conditions of UV Laser

Jong-Yeol Kim* · Nam-Ho Lee · Hyun-Kyu Jung

Department of Nuclear Convergence Technology Development, Korea Atomic Energy Research Institute (KAERI), Daejeon, 34057, Korea

요 약

본 논문에서는 격자 공정 중에 KrF 엑시머 UV 레이저 노출시간에 따른 광섬유 브래그 격자의 Co^{60} 감마방사선 영향을 연구하였다. 광섬유 브래그 격자는 게르마늄이 첨가된 일반 광섬유를 이용하였으며, UV KrF 엑시머 레이저 노출시간(30, 60, 90, 120초)을 달리하여 제작하였다. 제작된 광섬유 브래그 격자에 106 Gy/min 선량률로 총 선량 34.3 kGy 감마선을 조사한 후 방사선에 의한 온도감도 계수와 브래그 파장 변화를 분석하였다. 실험결과를 통하여, 격자 공정을 위한 UV 레이저 노출시간이 광섬유 브래그 격자의 방사선 민감도에 큰 영향을 줄 수 있다는 것을 확인하였다. 레이저 노출조건 변화에 따른 방사선에 의한 광섬유 브래그 파장의 변화는 최대 50 % 이상의 차이를 보였다.

ABSTRACT

We studied the effect of Co^{60} gamma-radiation on the fiber Bragg gratings (FBGs) by irradiation time of UV Krypton fluoride (KrF) excimer laser among grating processing parameters. The FBGs were fabricated in a different UV laser irradiation time at 30, 60, 90, and 120 seconds using the same commercial Ge-doped silica core fiber (SMF-28e). It was exposed to gamma-radiation up to a high dose of 34.3 kGy at the dose rate of 106 Gy/min, and then it was analyzed radiation effects by measuring the radiation-induced change in the temperature sensitivity coefficient and Bragg wavelength shift. According to the experimental results, We confirmed that the UV laser irradiation period for grating inscription has a highly effect on the radiation sensitivity of the FBGs. The radiation-induced Bragg wavelength shift by the change of laser irradiation conditions showed a difference more than about 50 %.

키워드 : 감마선, 광섬유 브래그 격자 센서, UV 레이저, 방사선 영향

Key word : Gamma ray, Fiber Bragg grating, UV laser, radiation effect

Received 13 September 2016, **Revised** 20 September 2016, **Accepted** 27 September 2016

* **Corresponding Author** Jong-Yeol Kim(E-mail:kimjr@kaeri.re.kr, Tel:+82-42-868-2734)
Department of Nuclear Convergence Technology Development, Korea Atomic Energy Research Institute, Daejeon, 34057, Korea

Open Access http://doi.org/10.6109/jkiice.2016.20.12.2310 print ISSN: 2234-4772 online ISSN: 2288-4165

ⓒThis is an Open Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License(http://creativecommons.org/li-censes/by-nc/3.0/) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.
Copyright Ⓒ The Korea Institute of Information and Communication Engineering.

Ⅰ. 서 론

현재 원전에 사용되는 공정계측 센서는 크게 압력, 온도, 수위, 유량 센서로 구분된다. 대부분 포인트 방식으로 열전대 온도센서인 Thermocouple 또는 Thermistors 등 방사(복사)형 온도센서와 정전용량식 센서로 구성된 압력, 수위, 유량센서가 주로 사용되고 있다. 하지만 이들 센서는 중대사고가 발생하여 전원이 상실되었을 경우 기능이 중단되는 문제점을 후쿠시마 원전의 사고에서 확인한 바 있다.

원전의 안전을 위협하는 다양한 요인 중에서 특히 원자로 발전 설비의 핵심인 원자로 내부나 원자력 압력용기, 냉각기, 주요배관 등 원자력 안전계통 설비의 온도 상승, 압력변화, 진동 등의 문제는 심각한 사고로 이어질 가능성이 있어 지속적인 모니터링이 필요하다. 현재 원전 안전성 향상과 관련하여 센서 및 계측기술에 대한 다양한 연구가 진행되고 있다.

광섬유 센서는 환경변화에 따른 광 신호의 파장 및 광세기 변화를 측정하는 방식으로 사용되며 센싱 민감도가 높고 화재의 위험이 적을 뿐만 아니라 한 라인(line)의 광섬유를 통하여 특정영역의 온도, 압력, 변이를 동시에 측정 가능하다. 또한 광섬유 센서는 현재 설치된 원전 온도센서와 달리 원전 중대사고 시 전원 공급이 불가능한 상황에서도 수 km의 외부로 부터 내부 사고환경의 모니터링이 가능하고, 기존 센서가 갖는 장거리 전송과 원격 조정의 한계를 극복할 수 있는 센서로서 원전 혹은 우주용 극한환경 센서에 적합한 특성을 가진다[1-4].

특히, 광섬유 센서의 한 종류인 광섬유 브래그 격자(Fiber Bragg grating, FBG)는 광섬유 코어 내에 UV 레이저 혹은 펨토초(Femto-second) 펄스형 레이저를 이용하여 굴절률 격자를 새겨서 Bragg 조건에 따른 특정 파장이 반사되는 현상을 이용한 것으로 주변의 환경 변화에 따라 Bragg 조건이 바뀌어 FBG 반사 파장의 변화를 측정하는 광기술을 기반으로 한다. FBG는 Bragg 조건을 만족하는 파장만을 반사하고, 그 외의 파장은 그대로 투과시키는 특성을 갖는다[5].

하지만 일반적인 공정으로 제작된 FBG 센서의 경우, 수십 kGy급 이상의 고준위 방사선에 의한 광섬유 전송 손실(radiation induced attenuation, RIA), 브래그 파장(λ_B) 이동현상(Bragg wavelength shift, BWS), 반사율 변화, 온도 감도 계수(α_0) 변화 등의 문제로 인해 현재까지 원전과 같은 극한 환경용 센서로 적용함에 있어 한계점을 가지고 있다[6-9].

고방사선 환경에서 견딜 수 있는 내방사선 FBG 센서 연구는 광섬유 조성, 격자공정 기법 등을 통해 국외에서 다양한 연구가 수행되었다. 최근 국외 연구사례에 따르면, 방사선 환경에서 FBG 센서의 안정성을 높일 수 있는 내방사선 공정변수로는 FBG 광민감화 공정(수소로딩), 레이저 공정, FBG 공정기법, 방사선 전조사(pre-irradiation), 어닐링 공정, 광섬유 종류 등이 보고되고 있다[1, 7, 10].

극한 환경용 내방사선 광섬유 센서 연구는 벨기에 SCK·CEN과 독일의 Fraunhofer 연구소를 중심으로 광섬유 센서의 공정조건별 수소로딩, 펨토초 공정, 특수 코팅 등을 이용한 내방사화 기법 연구가 진행되고 있다. 벨기에 SCK·CEN 에서는 원자력 설비와 같은 방사선 환경에서 활용할 수 있는 FBG 및 Raman 센서에 대한 연구를 수행하였으며 FBG 센서의 방사선 종류, 광섬유 종류, FBG 공정기법 등 다양한 파라미터에 따른 방사선 영향을 분석하였다[11].

독일의 FemtoFiberTec사는 펨토초 레이저를 이용한 펄스형 FBG 센서 공정기술을 상용화하였으며 이 기술을 이용하면 광섬유 종류, 코팅 종류와 관계없이 FBG 센서 제작이 가능하다. 또한 뛰어난 내구성을 가지고 있어서 고온 및 내방사선 환경에 활용이 가능할 것으로 기대되고 있다[1, 9].

본 논문에서는 게르마늄이 함유된 일반 광섬유(Corning SMF-28e)를 이용하여 고방사선 환경에서 FBG 센서의 안정성을 높일 수 있는 내방사화 기법을 연구하였다. 먼저 FBG 센서의 내방사선 특성과 관련된 공정변수(레이저 노출시간)를 변경하여 다양한 FBG를 자체 제작하였으며, 감마 방사선 조사에 의한 센서의 광특성 변화를 분석하였다.

Ⅱ. FBG 센서의 방사선 영향

2.1. 방사선 영향

실리카(SiO_2) 유리 기반 광섬유의 경우 방사선 조사 시 생성되는 프리커서(precursor), 컬러센터(Color center)에 의해 굴절률의 변화 및 광전송 손실을 초래한

다. 방사선 조사에 의해 생성된 조성 결함(Broken bonds)이 주변 원소의 전자나 수소원소 등의 Diffusion, Trapping에 의해 새로운 결합(Strong bonds)으로 구성되어 광 전송 손실을 증가시키는 현상이다. FBG는 광섬유를 이용한 광학소자이기 때문에 광섬유와 유사한 방사선 효과가 나타나지만, 소자의 크기가 수십 mm 이내이기 때문에 방사선에 의한 광 전송 손실은 미비한 편이다.

하지만, 수십 혹은 수백 kGy 이상의 고방사선 환경에서 FBG는 Bragg 파장 이동 현상이 발생될 수 있으며, 이로 인해서 센서의 정확도가 떨어질 수 있다. 방사선에 의한 BWS 현상은 FBG 격자 공정 시 수행되는 수소로딩, 레이저 조사, 고온 어닐링 공정 등과 관련한 방사선 결함(Radiation defects)들의 생성이 원인이 될 수 있다.

2.2. 내방사선 요건

FBG의 광민감성(photosensitivity) 향상을 위해서 수소로딩 공정을 수행하지만, 수소로딩 공정은 방사선 민감도(Radiation sensitivity)를 현저히 상승시키는 효과를 보여준다. 또한 FBG 레이저 공정 시 레이저에 과도노출(overexposure)되면 방사선 민감도가 상승하는 경향이 나타나며, 어닐링 공정을 수행할 때 100℃ 이상의 고온에서는 온도가 상승할수록 방사선 민감도가 상승한다.

따라서 FBG 공정단계별로 방사선 민감도 상승에 기여하는 요인을 최소화시키고, 공정조건을 최적화하면 내방사선 특성을 향상시킬 수 있다.

Ⅲ. FBG 공정설계 및 제작

3.1. FBG 공정설계

FBG 센서를 제작하기 위해서 일반 통신용 및 광섬유 센서제작에 많이 사용되는 게르마늄(Ge)이 첨가된 광섬유(SMF-28e, Corning)를 선정하였으며, 주요 특성은 표 1과 같다.

UV 레이저 조건에 따른 FBG 센서 공정조건은 수소로딩 조건(3일, 5일)을 유지하고, 레이저 조건(노출시간)을 가변하여 진행하였다. FBG 레이저 공정 시 광섬유가 UV 레이저에 과도하게 노출되면 광섬유 내부 코어 및 클래딩에 손상이 발생한다. 따라서 방사선 민감도가 상승하는 특성이 최소화 되도록 레이저 출력, 반복률(Repetition rate) 등을 조정하였다.

Table. 1 The Specification of the optical fiber

Classification		Specification
Fiber type		SMF28-e (Corning)
Diameter [㎛]	Core	9.2±0.4
	Cladding	125.0±0.7
Dopants [wt %]	Core	GeO_2
	Cladding	-
Attenuation [dB/km]		≤0.34 @1310nm ≤0.20 @1550nm

Table. 2 Process conditions of fiber Bragg gratings

FBG	Grating fabrication parameters			
	H_2 loading	UV Laser condition		
		Intensity [mJ/cm^2]	Repetition rate [Hz]	Irradiation time [sec]
3-30-1	3 days	26.0	10	30
3-61-1	3 days	26.0	10	60
3-90-1	3 days	26.0	10	90
3-120-1	3 days	26.0	10	120
5-30-1	5 days	26.0	10	30
5-61-1	5 days	26.0	10	60
5-91-1	5 days	26.0	10	90
5-120-1	5 days	25.6	10	120

레이저 공정조건은 레이저 출력 26 mJ/cm^2, 반복률 10 Hz로 고정하였으며, 레이저 노출시간(Irradiation time)을 30, 60, 90, 120 초로 단계적으로 변경하여 총 32개(8종류)를 제작하였다. 표 2는 제작된 시료 중 대표적인 8개 샘플에 대한 공정조건을 나타낸다.

3.2. 제작된 FBG의 주요특성

표 3은 제작된 광섬유 브래그 격자의 주요특성을 나타낸다. 제작된 FBG의 Bragg 파장(λ_B)은 약 1520 ~ 1528nm 범위 내에서 제작되었으며, 온도감도계수는 10.2 ~ 10.4 pm/°C 범위의 값을 보였다. 반사율은 3-30-3, 3-61-1 샘플을 제외하고는 40% 이상의 값을 나

타내었다. 또한 레이저 노출시간이 증가할수록 반치대역폭(FWHM)이 증가하는 것으로 나타났으며, 90 ~ 140 pm 범위내의 값을 보였다.

Table. 3 Properties of manufactured FBGs

FBGs	Properties of FBGs			
	λ_B [nm]	Reflectivity [%]	α_0 [pm/°C]	FWHM [pm]
3-30-1	1520.84	6.8	10.3	100
3-61-1	1525.66	29.3	10.4	090
3-90-1	1521.11	49.8	10.2	100
3-120-1	1523.50	77.8	10.2	130
5-30-1	1518.30	41.3	10.2	100
5-61-1	1528.12	58.3	10.2	100
5-91-1	1528.27	83.5	10.2	130
5-120-1	1523.39	79.0	10.2	140

Ⅳ. 실험 및 결과

4.1. 실험

FBG 센서의 방사선 영향을 분석하기 위해서 그림 1과 같이 방사선 선원은 첨단방사선연구소(정읍)의 고준위 감마선 조사시설의 Co^{60} 감마선원을 이용하였다. 정확한 누적선량(Total dose) 측정을 위해서 FBG 센서와 함께 선량계(Alanine dosimeter)를 추가로 부착하였다. 방사선 조사조건은 광섬유의 방사선 시험절차서에 따라서 누적선량 및 선량율을 계산하였다[12].

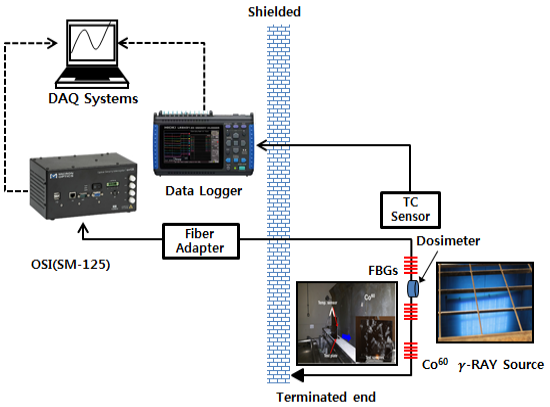


Fig. 1 Experimental set-up

실제 방사선에 조사된 누적선량은 계산된 값의 오차범위 10% 이내로 총 누적선량 34.3 kGy, 선량률은 106 Gy/min으로 확인되었다. 방사선 조사 중에 온도 상승에 대한 브래그 파장의 변화값은 FBG 주변에 설치된 온도센서(thermocouple, K type)를 통하여 조사시설 내부 온도변화량을 측정하여 실내 온도변화량에 따른 각 FBG 센서의 온도감도 계수를 계산하여 보정하였다.

4.2. 실험 결과

그림 2는 FBG 센서의 감마선 노출에 따른 실제 반사파의 특성을 실측한 것이다. FBG는 센서의 Bragg 파장은 감마선에 노출될수록 장파장 영역으로 이동하는 현상(Red shift)이 나타났다.

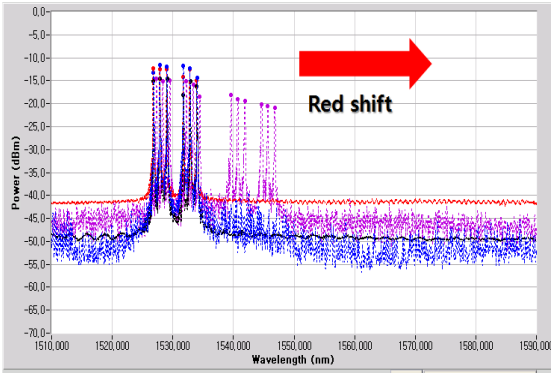
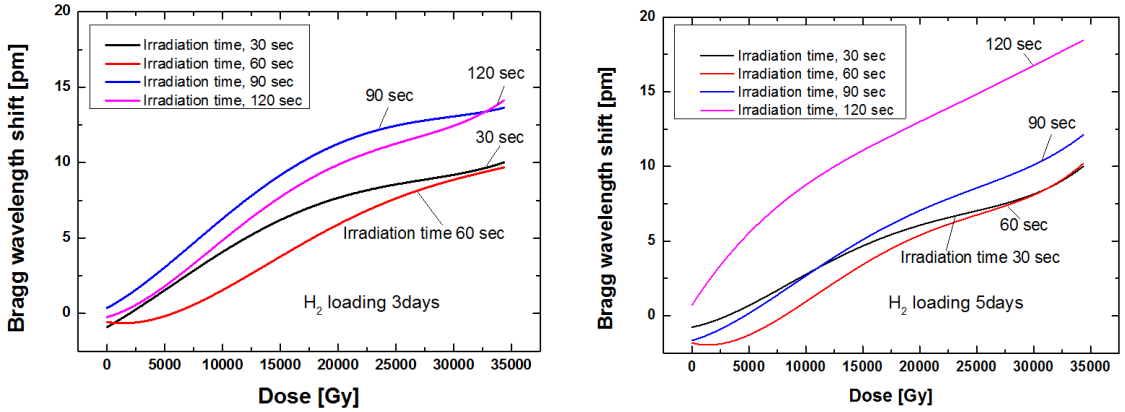


Fig. 2 Reflection spectra of the FBGs during gamma irradiation

그림 3은 레이저 노출시간에 따른 FBG 센서의 방사선 영향을 나타낸 것이다. FBG는 공정 시 레이저 조사시간이 길어질수록 방사선 민감도가 상승하는 경향을 보였으며, 수소로딩 조건(3일, 5일)간에는 동일한 경향이 나타났다. 수소로딩 5일을 수행한 광섬유로 제작한 FBG는 최대 17 pm, 최저 10 pm 의 Bragg 파장이동이 발생했으며 레이저 노출시간에 따라서 최대 50% 이상의 차이를 보였다.

표 4는 방사선 조사 전과 조사 종료 후 24시간 상온에서 어닐링 과정을 수행한 후 방사선에 의한 온도감도 계수(α_0)를 비교한 것이다. 방사선에 의한 FBG 센서의 온도감도 계수 변화율은 변화가 없거나 ±2.5 % 내외로 큰 차이가 없었다. 이전 광민감 광섬유로 제작한 FBG의 연구결과[13]와 비슷한 경향을 보였으며, UV 레이



(a) (b)

Fig. 3 Radiation effect of FBGs on irradiation conditions of UV laser (a) H_2 loading for 3 days (b) H_2 loading for 5 days

저의 노출시간이 방사선 조사 후 FBG 센서의 온도감도 계수 변화와는 큰 관련이 없음을 확인하였다.

Table. 4 Change of temperature sensitivity coefficient after the irradiation

FBGs		Temperature coefficient [pm/℃]		Rate of variation [%]
H_2 loading [day]	Irradiation time [sec]	Before irradiation	After irradiation	
3	30	10.37	10.25	- 1.2
	60	10.42	10.16	- 2.5
	90	10.23	10.27	0.5
	120	10.25	10.28	0.2
5	30	10.20	10.20	0
	60	10.22	10.20	- 0.1
	90	10.21	10.20	0
	120	10.22	10.15	- 0.1

V. 결 론

본 연구에서는 게르마늄이 첨가된 상용 광섬유를 이용하여 FBG를 제작하였고, 국내최초로 FBG 공정조건 중 UV 레이저 노출시간을 변화시켜서 방사선에 대한 영향을 분석하였다. 제작된 FBG 시료를 대상으로 방사선에 의한 Bragg 파장과 온도 감도계수 변화에 대한 실험을 수행하였다.

실험결과를 통하여, FBG 가공 시 레이저 노출시간이 길어질수록 방사선 민감도가 상승하는 경향을 확인하였다. FBG의 방사선 민감도 상승은 격자 공정 시 광섬유가 UV레이저에 노출되는 시간이 길어질수록 광섬유 내에 Ge-Si 결합의 분해현상이 늘어나 GeE′, Ge(1), Ge(2)와 같은 불완전한 결함(Point defects)의 생성이 가속화되었고, 생성된 결함들은 감마선 조사 시 방사선 분해(radiolysis)에 의한 2차 결함을 생성하여 광섬유의 굴절률을 변화시킨 것이 주요원인으로 분석된다.

따라서 UV 레이저 조사 조건의 최적화를 통하여 광섬유 내부의 손상을 최소화 할 수 있고, 이와 더불어 FBG 센서의 내방사선 특성 향상이 가능하다. 또한 레이저 노출시간에 따른 FBG 반사파장의 반치대역폭을 100pm 이내로 조절이 가능하여 센서 분해능을 충분히 높일 수 있다.

내방사선 광섬유 센서 설계 및 제작기술은 광섬유 소재분야와 공정분야를 포함한 국내 신산업 창출과 더불어 향후 원전 원자로 구역의 사고 발생 시 무전원 상태에서도 원격지의 온도, 압력, 변이분포를 측정할 수 있는 센서로 활용[14]이 가능하며, 방사선 관련 설비와 함께 달탐사와 관련한 우주분야에도 적용이 가능할 것으로 예상된다.

ACKNOWLEDGMENTS

This paper was supported by the Ministry of Science, ICT & Future Planning and Civil Military Technology Cooperation Center.

REFERENCES

[1] H. Henschel, S. K. Hoffgen, K. Krebber, J. Kuhnhenn and U. Weinand, "Influence of fiber composition and grating fabrication on the radiation sensitivity of fiber Bragg gratings," *IEEE Transactions on Nuclear Science*, vol. 55, no. 4, pp. 2235-2242, Sep. 2008.

[2] A. I. Gusarov, D. B. Doyle, N. K. Karafolas, and F. Berghmans, "Fibers-Bragg gratings as a candidate technology for satellite communication payloads: radiation effects issues," *Conference on Photonics for Space Environments VII, SPIE Proceedings*, vol. 4134, pp. 253-260, Oct. 2000.

[3] P. Niewczas, and M. Johnston, "Effects of neutron-gamma radiation on fiber Bragg grating Sensors: A Review," *IEEE Sensors Journal*, vol. 12, no. 11, pp. 3248-3256, Aug. 2012.

[4] A. F. Fernamdez, F. Berghmans, A. I. Gusarov, et. al., "Multiplexed fibre Bragg grating sensors for in-core thermometry in nuclear reactors," *Conference on Fiber Optic Sensor Technology II, SPIE Proceedings*, vol. 4204A, pp. 40-49, Mar. 2001.

[5] A. I. Gusarov, F. Berghmans, O. Deparis, Y. Defosse, P. Megret, M. Decreton, and M. Blondel, "High total dose radiation effects on temperature sensing fiber Bragg gratings," *IEEE Photonics technology letters*, vol. 11, pp. 1159-1161, Sep. 1999.

[6] A. Gusarov, S. Vasiliev, O. Medvedkov, I. Mckenzie and F. Berghmans et. al., "Stabilization of fiber bragg gratings against gamma radiation," *IIEEE Transactions on Nuclear Science*, vol. 55, no. 4, pp 2205-2212, Aug. 2008.

[7] S. J. Mihailov, "Fiber Bragg grating sensors for harsh environments," *Sensors 2012*, vol. 12, no. 2, pp. 1898-1918, Feb. 2012.

[8] A. Gusarov, D. Starodubov, F. Berghmans, O. Deparis, Y. Defosse, A. F. Fernandez,d, M. Decreton, P. Megret, M. Blondel, "Comparative study of the MGy dose level γ -radiation effect on FBGs written in different fibres," *in Proceedings of 13rd International Conference on Optical Fibre Sensors*, Kyongju, Korea, pp. 608-611, Apr. 1999.

[9] IEC, "Optical fibres – Guidance for nuclear radiation tests," IEC/TR 62283, pp. 27-28, Jun. 2010.

[10] A. Morana, S. Girard, E. Marin, C. Marcandella, J. Périsse, J.-R. Macé, A. Boukenter, M. Cannas, and Y. Ouerdane, "Radiation hardening of FBG in harsh environments," *in Proceedings of 23rd International Conference on Optical Fibre Sensors*, vol. 9157, pp. 1-4, Jun. 2014.

[11] H. Henschel, S. K. Hoeffgen, K. Krebber, J. Kuhnhenn, and U. Weinand, "Influence of fiber composition and grating fabrication on the radiation sensitivity of fiber Bragg gratings," *IEEE Transactions on Nuclear Science*, vol. 55, no. 4, pp. 2235-2242, Aug. 2008.

[12] TIA/EIA Standard 455-64, *Procedure for Measuring Radiation- Induced Attenuation in Optical Fibers and Optical Cables*, TIA, Sep. 2002.

[13] J. Y. Kim, N. H. Lee, H. K. Jung, "Radiation effects on fiber Bragg grating sensors written in UV KrF laser process Condition," *Journal of the Korea Institute of Information and Communication Engineering*, pp. 161-166, vol. 20, no. 1, Jan. 2016.

[14] G. Y. Buymistriuc, "Radiation-Hard and Intelligent Optical Fiber Sensors for Nuclear Power Plants," in *Nuclear Power - Control, Reliability and Human Factors*, InTech Pub., ch 7, pp. 119-144, Sep. 2011.

김종열(Jong-Yeol Kim)

2009년 한양대학교 전자전기공학부 공학사
2011년 한양대학교 전자전기제어계측공학과 공학석사
2011년 ~ 현재 한국원자력연구원 선임연구원
※관심분야 : 내방사선 광섬유, 광섬유 분포형 센서, 부분방전 검출 센서

이남호(Nam-Ho Lee)

1993년 경북대학교 전자공학과 공학석사
2004년 충남대학교 전기공학과 공학박사
1992년 ~ 현재 한국원자력연구원 책임연구원
2009년 ~ 현재 충남대학교 전자전기공학부 겸임교수
※관심분야 : 원격제어, 원격센서, 영상신호처리

정현규(Hyun-Kyu Jung)

1981년 서울대학교 금속공학과 공학사
1987년 서울대학교 금속공학과 공학석사
2000년 한국과학기술원 재료공학과 공학박사
1983년 ~ 현재 한국원자력연구원 책임연구원
※관심분야 : 비파괴기술 센서, 센서의 방사선 영향, 원자력전지